

Estudos de visualização da esteira de bolhas tubulares em escoamento ascendente num fluido de Boger estagnado

M.J.F. Ferreira¹, J.D.P. Araújo², A.M.F.R. Pinto³ e J.B.L.M. Campos⁴

Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Química, Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte,
Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

¹email: fermjf@fe.up.pt ²email: daraujo@fe.up.pt ³email: apinto@fe.up.pt ⁴email: jmc@fe.up.pt

Sumário

Foi efectuado um estudo de visualização da esteira de bolhas tubulares individuais, em ascensão através de um fluido de Boger parado contido num tubo com 32 mm de diâmetro interno. O principal objectivo deste trabalho é identificar os efeitos elásticos no padrão de escoamento do líquido na esteira da bolha. Para tal, compararam-se as esteiras das bolhas em ascensão através do fluido de Boger com as obtidas num fluido newtoniano de viscosidade semelhante. Comparam-se ainda os resultados com os de trabalhos anteriores obtidos com bolhas tubulares em ascensão em fluidos viscoelásticos reofluidificantes.

A influência da componente elástica do fluido de Boger testado (PAA300¹), na hidrodinâmica da esteira de uma bolha tubular isolada, é apresentada pela primeira vez.

Palavras-chave: bolha tubular; esteira; fluido de Boger; fluido não-Newtoniano; escoamento gás-líquido.

1 Introdução

A visualização de escoamentos tem grande relevância prática em mecânica de fluidos, pois permite compreender uma diversidade de fenómenos físicos, evitando, ou servindo de suporte, ao recurso a métodos teóricos e/ou numéricos, de análise muito mais complexa.

Os fluidos não-newtonianos geralmente possuem viscosidade de corte elevada, pelo que grande parte dos escoamentos viscoelásticos se processa em condições de regime laminar, facilitando a utilização de técnicas de visualização. Uma compilação de fotografias ilustrativas de uma diversidade de escoamentos com fluidos não-newtonianos é ilustrada na obra de referência de Boger e Walters². Em contrapartida, as referências bibliográficas escasseiam para o caso de escoamentos gás-líquido com fluidos não-newtonianos, sendo inexistentes no que diz respeito à visualização de esteiras de bolhas tubulares de ar, em escoamento ascendente, através de fluidos de Boger estagnados.

Os fluidos de Boger têm a particularidade de possuírem uma elevada elasticidade aliada a uma viscosidade aproximadamente constante, podendo-se isolar de uma forma eficaz os efeitos elásticos². Desta forma, interpretam-se inequivocamente os resultados em termos da influência da elasticidade do fluido, sem a complicação adicional da variação da viscosidade com a taxa de deformação, característica da generalidade das soluções poliméricas.

O presente estudo assenta na visualização da esteira de bolhas tubulares de ar, em escoamento ascendente, num fluido de Boger PAA300¹ estagnado. Os resultados de visualização obtidos são comparados com os resultados de Sousa *et al.*⁴⁻⁶ que estudaram a esteira de bolhas tubulares ascendentes em fluidos reofluidificantes parados (soluções aquosas de carboximetilcelulose, CMC e de poliácridamida, PAA), numa coluna vertical com 32 mm de diâmetro interno, recorrendo às técnicas *PIV* (Velocimetria por Imagem de Partículas) e *shadowgraphy* (ombroscopia), sendo dado particular destaque à solução aquosa com 0.8 wt% em CMC, devido à semelhança da forma da esteira em comparação com a do fluido de Boger em estudo.

Recorreu-se também a um estudo comparativo de visualização, realizando-se experiências com um fluido newtoniano (designado por N91) com uma composição mássica em glicerina idêntica à do fluido PAA300 (90,98 wt%).

2 Instalação e procedimento experimental

O procedimento experimental e a técnica fotográfica usada na visualização do padrão de escoamento da esteira de bolhas tubulares isoladas (*slugs de gás ou bolhas de Taylor*, em inglês), em ascensão no fluido de Boger em

estudo, foi inspirado no trabalho de Campos e Guedes de Carvalho³. Na Figura 1 apresenta-se um esquema da instalação experimental. Duas secções de tubo em acrílico transparente (1), com 32 mm de diâmetro interno, estão ligadas através de uma válvula de esfera (V2). Esta válvula também possui um diâmetro interno de 32 mm, quando completamente aberta, de forma a não perturbar o escoamento durante a ascensão de um *slug de gás*.

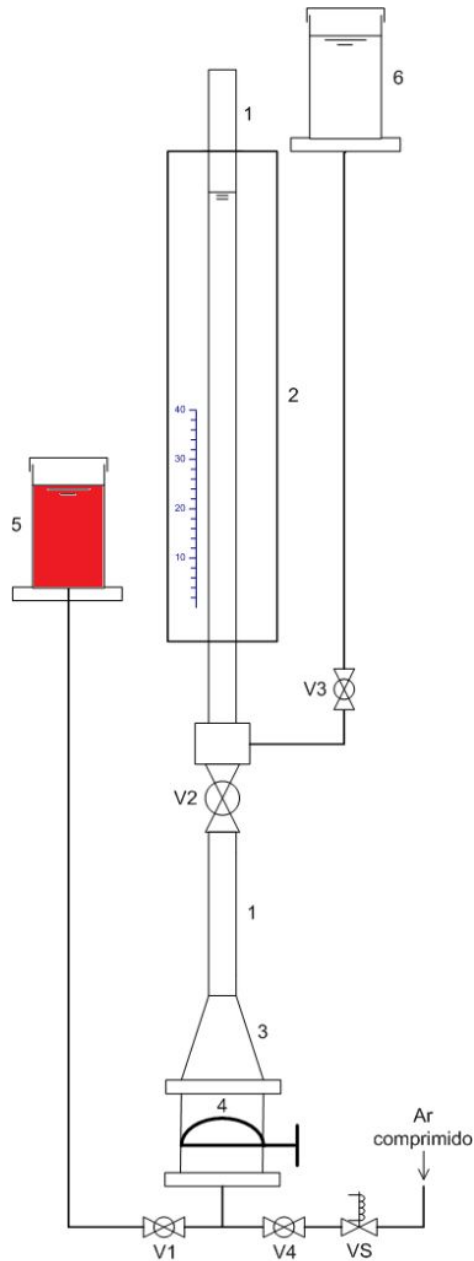


Fig.1. Representação esquemática da instalação experimental; coluna com 32 mm de diâmetro interno (1- tubo de acrílico; 2- caixa em acrílico; 3- contração cônica; 4- concha semi-esférica; 5- reservatório com fluido corado; 6- reservatório com fluido incolor; V1 a V4 – válvulas de esfera; VS – válvula de solenóide com temporizador).

Na base da coluna 1 encontra-se a zona de alimentação do líquido corado e do ar comprimido. Esta zona é constituída por uma contração cônica (3), ligada a uma porção de tubo cilíndrico de elevado diâmetro, no interior da qual se encontra uma concha semi-esférica (4), acima do ponto de injeção do ar, que pode ser rodada manualmente. A linha de injeção de ar encontra-se ligada à rede de ar comprimido, através de uma válvula de solenóide (VS) com temporizador. O tempo de abertura desta válvula é ajustado, permitindo variar o volume de

gás injectado, para uma determinada pressão de ar comprimido. A frequência de injeção das bolhas é também manipulada no temporizador acoplado a VS.

Os fluidos usados nas experiências de visualização do presente trabalho, foram uma solução aquosa com 90,98 wt% de glicerina (fluido newtoniano N91) e um fluido de Boger PAA300¹. Para uma determinada experiência, um volume suficiente de fluido teste é dividido em duas porções: a uma porção é adicionada uma pequena quantidade de um corante Solofenil vermelho 4AGE da Huntsman (0,175 wt%), enquanto a restante porção se mantém incolor. O líquido corado é depois contentorizado no reservatório (5), e o incolor no reservatório (6), esquematizados na Figura 1.

O líquido corado de vermelho é alimentado à instalação experimental, por gravidade, aquando da abertura da válvula V1, até que a sua superfície livre fique ligeiramente acima da válvula de esfera V2. Esta válvula é então fechada, e o líquido corado remanescente acima de V2 é completamente removido por sucção. De seguida, é alimentado o líquido incolor, também por gravidade, através da abertura da válvula de esfera V3, até este atingir um nível desejado no interior do tubo teste (1). A válvula V2 é então completamente aberta e um certo volume de ar é injectado na base da instalação, com a parte côncava da concha semi-esférica voltada para baixo. Rodando com suavidade a concha semi-esférica para cima, liberta-se a bolha tubular formada para a porção de líquido corado estagnado. Esta ascende através do fluido corado, penetrando em seguida na porção de líquido incolor. Uma sequência de fotografias, em modo de disparo contínuo de alta velocidade (5 disparos por segundo), são tiradas quando o *slug de gás* atravessa uma secção da coluna rodeada por uma caixa de acrílico transparente (2), de secção quadrada e faces planas, e preenchida com água por forma a minimizar os efeitos de distorção devido a curvatura do tubo teste (1).

As fotografias da esteira das bolhas tubulares em estudo foram tiradas com uma câmara fotográfica convencional (CANON EOS300), munida com uma lente macro EF100 mm f/2.8, posicionada num referencial fixo, para uma velocidade do obturador de 1/500 s, contra um fundo de luz branca de intensidade constante. O contraste de cor entre o vermelho e o incolor, na passagem de uma bolha tubular no fluido teste, permitiu o registo de “linhas de rasto” tornando visível a recirculação ou *transporte* de líquido corado na esteira, no caso do fluido newtoniano N91, e de efeitos tridimensionais, no caso do fluido de Boger PAA300. Uma escala métrica, colada na face anterior da caixa de visualização (2), permitiu a determinação do comprimento da bolha e da respectiva esteira.

Há dois aspectos importantes que foram considerados no projecto da instalação experimental, e que devem ser realçados. Por um lado, os fluidos foram sempre alimentados pela base e por gravidade, evitando-se, a formação de microbolhas de ar, caso a alimentação fosse feita pelo topo da coluna, e uma eventual degradação mecânica do fluido, caso se usasse bombas para alimentar o líquido à instalação. Por outro lado, o fluido de teste encontra-se isolado da atmosfera nos reservatórios 5 e 6 (*vide* Figura 1), excepto nas superfícies livres do líquido, aspecto importante pelo facto das soluções usadas nas experiências serem higroscópicas.

3 Composição e caracterização reológica dos fluidos teste

A composição dos fluidos usados neste trabalho, foi inspirada na Tese de Doutoramento de M.A.M. Alves¹. Na Tabela 1 resume-se as composições e características dos dois fluidos estudados.

Tabela 1. Composição (em concentração mássica) dos fluidos utilizados nas experiências de visualização.

<i>Designação do fluido teste</i>	PAA [ppm]	Glicerina [%]	Água [%]	NaCl [%]	Kathon [ppm]	ρ [kg/m ³]
N91	-	90,98	9,02	-	-	1235
PAA300	300	90,97	7,50	1,50	25	1248

O fluido teste N91 é um fluido newtoniano constituído por glicerina e água. O PAA300 é um fluido de Boger, obtido por adição de uma pequena quantidade de poliacrilamida (PAA, Separan AP30, *Massa molecular*: 14 a 17×10^6 kg/kmol) à solução newtoniana de que faz parte, com o objectivo de se obter um fluido com razoável elasticidade e com viscosidade de corte praticamente independente da taxa de deformação. Para se evitar uma possível degradação bacteriológica da solução PAA300, adicionou-se uma pequena quantidade de um agente biocida (Kathon LXE da Rohm & Haas). As massas volúmicas dos dois fluidos teste foram determinadas, para a temperatura de 27,0 °C, com a ajuda de um densímetro (escala 1,200/1,300 g/cm³).

O fluido newtoniano N91 apresenta uma viscosidade de corte de $0,167 \pm 0,05$ Pa.s a 27,0 °C (temperatura média a que decorreram as visualizações com esse fluido), medida com um viscosímetro do tipo *falling ball* (GV 2200, Gilmont Instruments).

As propriedades reológicas do fluido de Boger PAA300 foram medidas com um reómetro rotacional Physica MCR 301 da Anton Paar, usando-se uma geometria de cone e prato. Foi utilizado um cone com diâmetro 75 mm e ângulo 1°. A escolha desta geometria baseou-se na vantagem que oferece em termos de controlabilidade do escoamento, uma vez que toda a amostra está sujeita à mesma taxa de deformação (devido ao ângulo ser pequeno; idealmente igual ou inferior a 4°)¹.

Na Figura 2 apresenta-se o resultado da medição em escoamento de corte simples estacionário, efectuada à temperatura de 27,0 °C. Um aspecto importante diz respeito à necessidade de medir com rigor a temperatura a que são efectuadas as visualizações, e garantir que estas são efectuadas em condições isotérmicas. Caso a temperatura varie, é necessário estudar a influência da grandeza na viscosidade do fluido, de forma a traduzir adequadamente essa dependência na gama estudada.

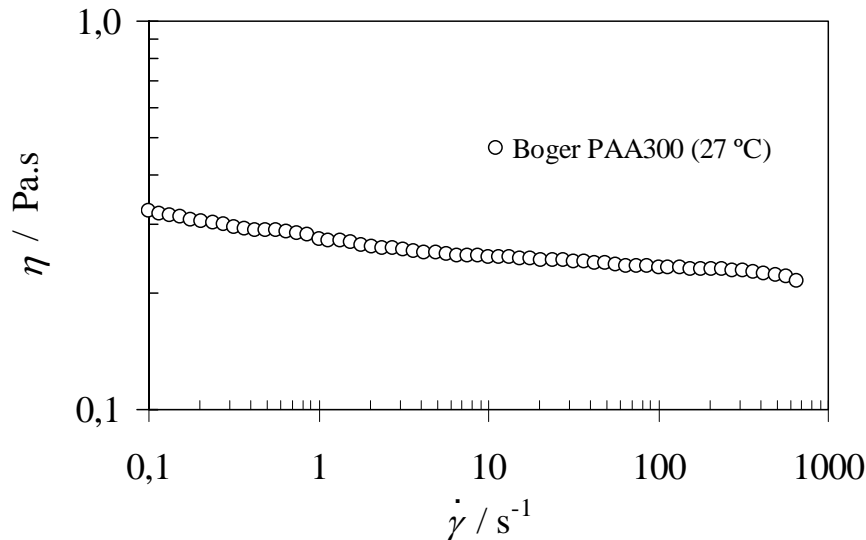


Fig.2. Variação da viscosidade de corte com a taxa de deformação para o fluido de Boger PAA300.

Verifica-se, por análise da figura anterior, que a viscosidade de corte diminui apenas cerca de 10% por cada década de $\dot{\gamma}$, pelo que se pode classificar o fluido PAA300 como um fluido de Boger¹.

Completou-se a caracterização reológica do fluido PAA300, determinando-se o tempo de relaxação em condições de escoamento extensional, por recurso a um reómetro extensional Haake CaBER 1 da Thermo Scientific. Nos dois ensaios efectuados, à temperatura de 27,0 °C, usou-se um prato circular com 6 mm de diâmetro. O tempo de relaxação médio obtido foi de $\lambda = 0,227$ s.

4 Resultados experimentais de visualização da esteira de bolhas tubulares

Foram efectuadas visualizações com o fluido newtoniano N91, com o intuito de analisar o efeito da viscosidade no padrão de escoamento da esteira da bolha tubular, e comparar com o *efeito da elasticidade*, que se espera isolado, do fluido de Boger em estudo. Essa comparação é sumariada no final desta secção (Tabela 2), onde são também apresentados resultados obtidos por Sousa *et al.*⁴⁻⁶, sobre a influência do *efeito da elasticidade* na esteira de bolhas tubulares, em ascensão noutros fluidos viscoelásticos estagnados, num tubo vertical de 32 mm de diâmetro interno.

Na Figura 3 mostra-se uma bolha tubular, em ascensão no fluido newtoniano N91, com boa visualização do corpo da bolha e respectiva esteira. Verifica-se a presença de uma esteira bem definida, com recirculação fechada de líquido corado. Para um determinado volume de bolha escolhido, como o ilustrado nas imagens da Figura 3, determinaram-se os comprimentos médios de $L = 5,5$ cm e $l = 1,1$ cm, para a bolha e esteira, respectivamente.

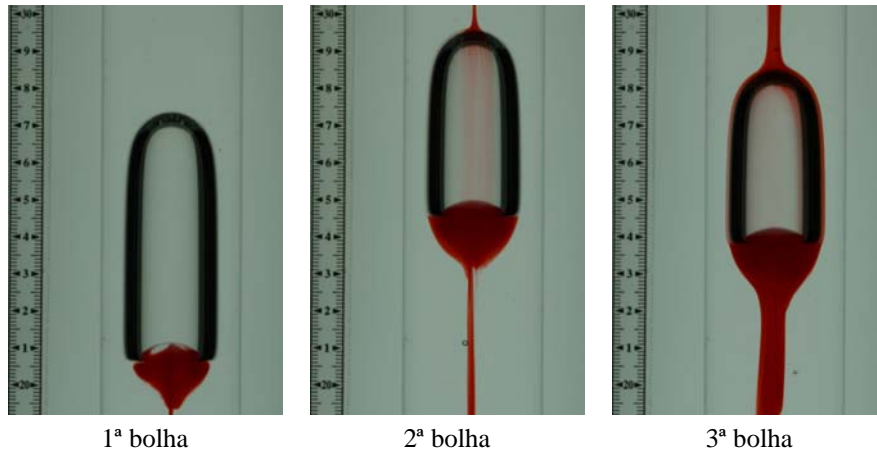


Fig.3. Bolhas tubulares em escoamento ascendente, através de fluido newtoniano N91 estagnado, numa coluna de 32 mm diâmetro interno. As visualizações decorreram à temperatura de 27,0 °C.

Podemos constatar que o padrão de escoamento na esteira da bolha, no caso do fluido N91, é laminar e axissimétrico³, com valores de número inverso de viscosidade, $N_f = 133$ ($N_f = \sqrt{gD^3/\nu}$, em que ν é a viscosidade cinemática) e número de Reynolds, $Re = 41$ ($Re = \rho U_b D / \eta_f$, onde ρ representa a massa volúmica do líquido, U_b a velocidade da bolha tubular e η_f a viscosidade absoluta do líquido. Esta última será a viscosidade de corte do líquido, a uma determinada taxa de deformação, $\dot{\gamma}$, no caso dos fluidos não newtonianos, a seguir apresentados).

A Figura 4 mostra bolhas tubulares de ar isoladas, em ascensão no fluido de Boger em estudo, PAA300, que se encontra parado no interior de uma coluna com diâmetro interno de 32 mm.

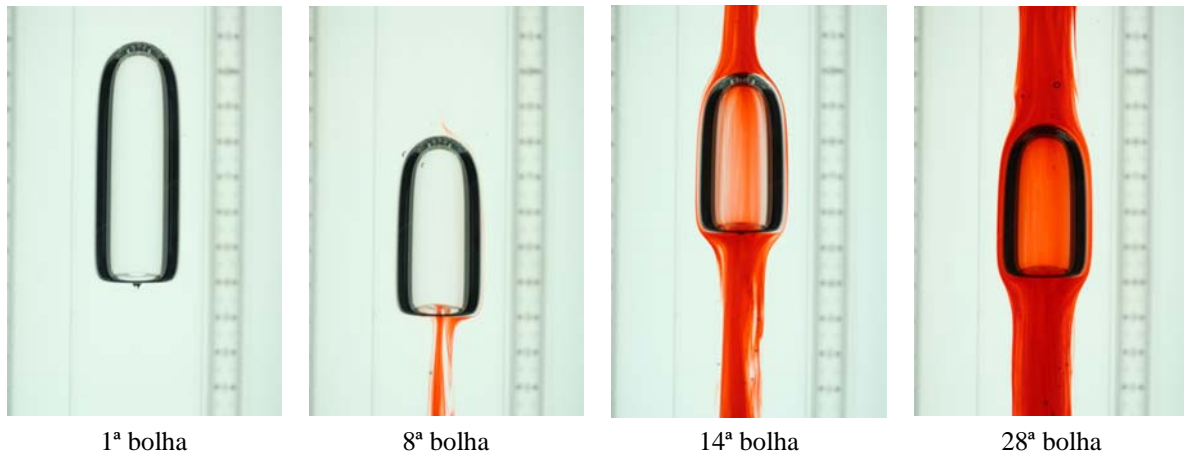


Fig.4. Bolhas tubulares em escoamento ascendente, através de fluido de Boger PAA300 estagnado, numa coluna de 32 mm diâmetro interno. As visualizações decorreram à temperatura de 27,0 °C.

Verifica-se, por análise das fotografias apresentadas na Figura 4, a supressão de uma esteira bem definida em comparação com o caso do fluido N91. Apesar do fluido PAA300 ter a mesma concentração mássica em glicerina que o fluido N91, a existência de 300 ppm de polímero PAA são suficientes para alterar radicalmente o padrão de escoamento na esteira do *slug* (de volume e comprimento de corpo de bolha semelhante aos *slugs* apresentados na Figura 3.).

Uma observação mais atenta à parte inferior da 1ª bolha apresentada na Figura 4, evidencia a ocorrência de uma pequena extremidade cuspíde (que não é tão visível na 8ª, 14ª e 28ª bolhas escolhidas, apesar de estar presente). As imagens das fotografias referentes à 14ª e 28ª bolhas, da Figura 4, parecem mostrar que, na eventual ocorrência de recirculação de líquido na esteira (que a técnica de visualização utilizada não permite detectar), esta deverá ser mínima contrariamente ao que acontece numa esteira axissimétrica.

Constata-se pois a ocorrência de um padrão de escoamento algo complexo, na zona imediatamente inferior à base do *slug de gás*, em ascensão num fluido de Boger estagnado, com predominância de efeitos elásticos, uma vez que os de inércia não são significativos. De seguida é apresentada a Figura 5, onde se encontra uma sequência de imagens da esteira da 39ª bolha (com um corpo mais comprido) em ascensão no fluido de Boger PAA300.

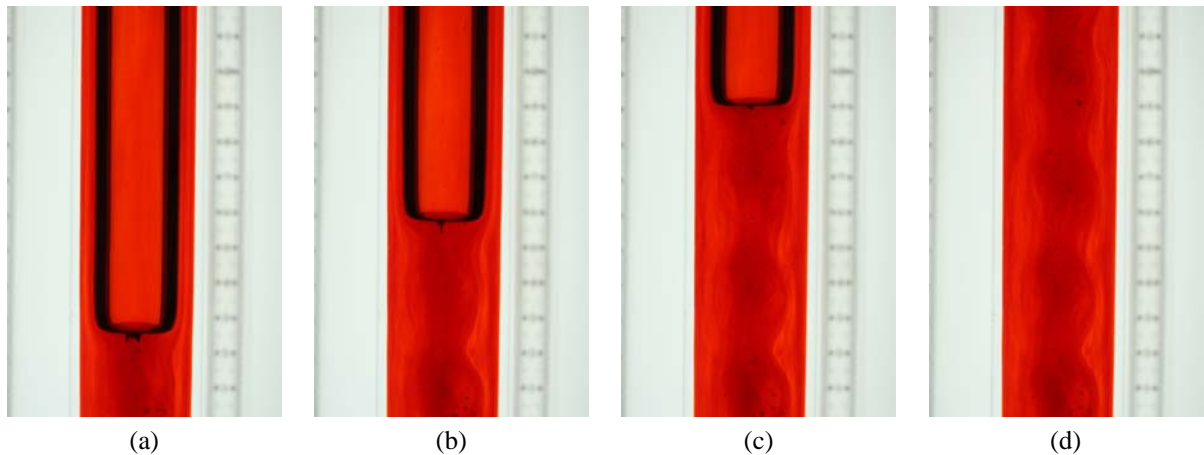


Fig.5. Esteira da 39ª bolha tubular de ar (*comprida*) em escoamento ascendente no fluido de Boger PAA300 estagnado, numa coluna de 32 mm diâmetro interno. A série de fotografias, vistas de (a) para (d), foram captadas em intervalos sequenciais de 0,2 s. As visualizações decorreram à temperatura de 27,0 °C.

Seguindo as fotografias apresentadas na figura anterior, no sentido de (a) para (d), verifica-se que o padrão de escoamento na zona da esteira da bolha é complexo, tridimensional, e com formação de uma pequena extremidade cuspíde, que é vista com diferentes orientações durante a ascensão da bolha tubular, indicativo de movimento rotacional da mesma com velocidade considerável. Simultaneamente, notou-se uma oscilação axial da base da bolha que contém a extremidade cuspíde, inferindo-se periódica, com capacidade de promover algum desprendimento de líquido dessa pequena extremidade, lançando-o para a vizinhança (*vide* sequência de fotografia (b) →(c)).

As fotografias (c) e (d) da Figura 5 mostram, claramente, para bolhas tubulares longas, uma assimetria da esteira no plano central da coluna. Observa-se a formação e crescimento moderado de zonas de circulação definidas, não totalmente fechadas, na zona mais central do tubo, imediatamente após a passagem da bolha. Devido às características elásticas do fluido PAA300, este padrão repetitivo permanece com a mesma forma durante breves instantes.

O padrão de escoamento da esteira, atrás descrito, foi de certa forma observado por Sousa *et al.*^{4,6} nos seus estudos de visualização com *PIV* e *shadowgraphy* para fluidos reofluidificantes. Para o caso particular de uma solução aquosa de 0,8 wt% CMC, são apresentados na Figura 6 resultados obtidos por Sousa (2005)⁷.

Na Tabela 2 apresentam-se algumas variáveis e os números adimensionais de Reynolds e de Débora, com o objectivo de caracterizar o escoamento para os dois fluidos testados no presente trabalho. São também apresentados os valores obtidos por Sousa *et al.* para os fluidos 0,80 wt% CMC^{4,5} e 0,20 wt% PAA⁶.

(Os valores do número de Débora incluídos nessa tabela são obtidos por, $De = \lambda \dot{\gamma}_f$, em que $\dot{\gamma}_f$ é uma taxa de deformação característica do escoamento dada por $\dot{\gamma}_f = U_b / D$, com unidades s^{-1}).

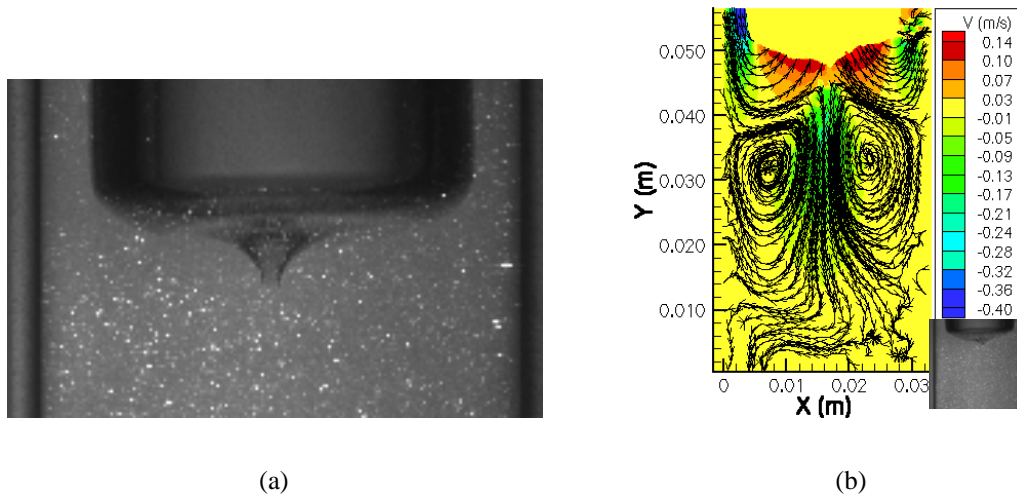


Fig.6. Esteira de uma bolha tubular de ar isolada em escoamento ascendente numa solução aquosa de 0,8 wt% CMC estagnada, numa coluna de 32 mm diâmetro interno: (a) fotografia; (b) campo de velocidades⁷.

Tabela 2. Variáveis e números adimensionais de Re e De para o escoamento dos fluidos N91 e PAA300 num tubo vertical com 32 mm de diâmetro interno. Comparação com os valores obtidos por Sousa *et al.*^{4,6}.

Designação do fluido	Glicerina [%]	PAA [%]	CMC [%]	T [K]	$\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	λ [s]	U_b [m/s]	Re	De	De/Re
Newtoniano N91	90,98	-	-	300,15	-	-	0,174	41	-	-
Boger PAA300	90,97	0,03	-	300,15	0,1 - 650	0,227	0,160	26	1,1	0,04
Reofluidificante 0,80 wt% CMC ^{4,5}	-	-	0,80	295,5	0,04 - 4000	0,029	0,182	8	0,2	0,03
Reofluidificante 0,20 wt% PAA ⁶	-	0,20	-	294,05	30 - 400	2,3	0,196	41	14	0,34

Por análise dos valores apresentados na Tabela 2, verifica-se que, apesar da ocorrência semelhante na forma de uma pequena extremidade cuspide na base da bolha tubular, os valores dos parâmetros λ e De para os fluidos PAA300 (de Boger) e 0,80 wt% CMC^{4,5} (reofluidificante) apresentam uma diferença de uma ordem de grandeza.

Efectivamente, a origem da forma da pequena extremidade cuspide, cuja formação se verifica na base da bolha tubular em ascensão nos fluidos de Boger PAA300 e 0,80 wt% CMC^{4,5}, poderá ter como causa um efeito elástico. Na solução de CMC comprovou-se a existência de uma esteira negativa (fluido em escoamento na direcção oposta à de subida da bolha). A técnica de visualização usada neste trabalho (contraste de cor sobre um fundo de luz branca e fotografia em referencial fixo) não permitiu inferir sobre a ocorrência de *esteira negativa*. O cálculo do número de elasticidade, dado por De/Re , comprova que nestes dois fluidos a predominância dos efeitos elásticos face aos viscosos é semelhante.

Relativamente ao fluido reofluidificante 0,20 wt% PAA⁶, este apresenta um valor de Débora elevado (14), indicativo de uma solução muito elástica ($De/Re=0,34$). Sousa *et al.*⁶ relataram a presença de esteiras muito compridas com fluido em ascensão ao longo da coluna, como que “puxado” pela bolha. Está prevista a realização de experiências com a técnica conjunta de PIV e fotografia, em referencial fixo e lagrangiano, para aprofundar o estudo do padrão de escoamento da esteira de bolhas tubulares em ascensão através de fluidos de Boger estagnados, em colunas com diâmetros internos 19, 32 e 52 mm.

5 Conclusões

Os padrões de escoamento das esteiras de bolhas tubulares isoladas, obtidas nas condições do presente trabalho, com o fluido newtoniano N91 e com o fluido de Boger PAA300 estagnados, numa coluna vertical de 32 mm de diâmetro interno, revelaram-se muito diferentes, como era esperado. No caso do fluido N91, não existe componente elástica, prevalecendo os efeitos viscosos de corte no padrão de escoamento. Contrariamente ao

observado com fluidos newtonianos, em que a diminuição da viscosidade de corte conduz a um crescimento progressivo do comprimento de recirculação da esteira (com possibilidades de oscilação a partir de um certo valor de Re crítico)³, com o fluido de Boger PAA300, o padrão de escoamento da esteira mostrou-se mais complexo: observou-se a ocorrência de uma pequena extremidade cuspide na base da bolha, não estacionária, com supostas pequenas zonas de recirculação abertas a montante.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projecto com referência PTDC/EQU-FTT/69068/2006.

Referências

1. M.A.M. Alves, *Escoamentos de fluidos viscoelásticos em regime laminar. Análise numérica, teórica e experimental*, Tese de Doutoramento, FEUP, Portugal, 2004.
2. D.V. Boger, K. Walters, *Rheological phenomena in focus*, Rheology Series 4, Elsevier, 1993.
3. J.B.L.M. Campos, J.R.F. Guedes de Carvalho, An experimental study of the wake of gas slugs rising in liquids, *J. Fluid Mech.*, 196, 27-37, 1988.
4. R.G. Sousa, S. Nogueira, A.M.F.R. Pinto, M.L. Riethmuller, J.B.L.M. Campos, Flow in the negative wake of a Taylor bubble rising in viscoelastic carboxymethylcellulose solutions: particle image velocimetry measurements, *J. Fluid Mech.*, 511, 217-236, 2004.
5. R.G. Sousa, M.L. Riethmuller, A.M.F.R. Pinto, J.B.L.M. Campos, Flow around individual Taylor bubbles rising in stagnant CMC solutions: PIV measurements, *Chem. Engng Sci.*, 60, 1859-1873, 2005.
6. R.G. Sousa, M.L. Riethmuller, A.M.F.R. Pinto, J.B.L.M. Campos, Flow around individual Taylor bubbles rising in stagnant polyacrylamide (PAA) solutions, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 135, 16-31, 2006.
7. R.L.G. Sousa, *Flow of Taylor bubbles rising in stagnant non-Newtonian fluids*, Tese de Doutoramento, FEUP, Portugal, 2005.